



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



EVALUACIÓN DE LA ESCORIA BLANCA COMO ÁRIDO FINO EN HORMIGONES BITUMINOSOS

Trabajo realizado por:

Darío Barquín Piñera

Dirigido:

Pedro Lastra González

Ángel Vega Zamanillo

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, Septiembre de 2019

TRABAJO FIN DE GRADO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
1.1. Introducción	10
1.2. Mezclas calientes para capas de rodadura	10
1.3. Sostenibilidad ambiental en la construcción de carreteras	12
1.3.1. Uso de materiales reciclados	13
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	25
3.1. Áridos naturales	26
3.2. Áridos alternativos	27
3.3. Ligante	28
4. METODOLOGÍA	29
4.1. Contenido en huecos	30
4.2. Determinación de la energía de compactación	31
4.3. Adhesividad árido-ligante	32
4.4. Resistencia a las deformaciones plásticas	32
4.5. Pérdida de partículas	33
4.6. Esguerramiento del ligante	36
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1. Mezclas AC	39
5.1.1. Caracterización granulométrica	39
5.1.2. Densidad y porcentaje de huecos	40
5.1.3. Determinación de la energía de compactación	41
5.1.4. Adhesividad árido-ligante	44
5.1.5. Resistencia a las deformaciones plásticas	45
5.2. Mezclas PA	45
5.2.1. Caracterización granulométrica	45

5.2.2.	Densidad y porcentaje de huecos.	46
5.2.3.	Determinación de la energía de compactación.....	47
5.2.4.	Adhesividad árido-ligante	49
5.2.5.	Pérdida de partículas	49
5.2.6.	Escurrimiento del ligante	50
6.	CONCLUSIONES	52
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	54
8.	REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección tipo de una carretera compuesta por una mezcla bituminosa en España (Autor: Carlos Real).....	11
Figura 2. Costes asociados a la construcción de una mezcla bituminosa.	13
Figura 3. Esquema de horno de arco eléctrico	14
Figura 4. Escoria negra de horno de arco eléctrico [13]	15
Figura 5. Aplicación de escoria negra en subbase. Urbanización en Reocín.....	18
Figura 6. Filler de escoria blanca.	19
Figura 7. Resultados de los ensayos de módulo resiliente, tracción indirecta y TFE en ambas mezclas	22
Figura 8. Resultados del ensayo SCB.	22
Figura 9. Evolución retención de agua en función del aditivo empleado.[28].....	23
Figura 10. Granulometría del árido calizo	26
Figura 11. Escoria blanca tras el ensayo de hinchamiento.....	27
Figura 12. Granulometría escoria blanca	28
Figura 13. Máquina giratoria ICT250 de Controls.....	32
Figura 14. Máquina INFRATEST del ensayo de pista	33
Figura 15. Máquina de Los Ángeles.	34
Figura 16. Probetas de Cántabro seco y húmedo una vez ensayadas.....	35
Figura 17. Cesta en horno durante la realización del ensayo.	36
Figura 18. Granulometría recuperada en las probetas con escoria blanca como árido fino.....	39
Figura 19. Curva granulométrica CA.....	40
Figura 20. Variación del número de huecos en función del logaritmo neperiano del número de giros de las mezclas AC.	42
Figura 21. Energía requerida para alcanzar un contenido de huecos en función de la temperatura de las mezclas AC	43
Figura 22. Curva granulométrica PA referencia.	46
Figura 23. Variación del número de huecos en función del logaritmo neperiano del número de giros de las mezclas PA.....	47
Figura 24. Energía requerida para alcanzar un contenido de huecos en función de la temperatura de las mezclas PA.....	48

Figura 25. Escurrimento del betún al finalizar el ensayo.....	51
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de escoria de acería en EE.UU. en función de su uso ([12]).....	14
Tabla 2. Valores máximos de lixiviados admisibles.	15
Tabla 3. Valores medios de lixiviados de los áridos procedentes de escorias blancas [13].....	18
Tabla 4. Resultado de los valores de la concentración total de ambas escorias comparados con los valores de la EPA[22].....	20
Tabla 5. Caracterización de los áridos naturales	26
Tabla 6. Caracterización de los áridos alternativos.....	27
Tabla 7. Porcentaje de huecos para mezclas AC y PA.....	30
Tabla 8. Especificaciones del ensayo de Sensibilidad al agua según el PG-3 para capa de rodadura.....	32
Tabla 9. Valores exigidos para las deformaciones plásticas del PG-3 en hormigones bituminosos	33
Tabla 10. PG-3: Anejo 543.5.1.5 y PG-3 (2004): Anejo 542.5.1.	35
Tabla 11. Ensayo de huecos en las mezclas AC.	41
Tabla 12. Parámetros de compactibilidad de las mezclas AC.....	42
Tabla 13. Energía acumulada en función del porcentaje de huecos de las mezclas AC.....	44
Tabla 14. Ensayo de sensibilidad al agua en las mezclas AC.	44
Tabla 15. Ensayo de rodadura sobre hormigones bituminosos con filler de escoria blanca	45
Tabla 16. Ensayo de huecos en las mezclas PA.	46
Tabla 17. Parámetros de compactibilidad de las mezclas PA.	48
Tabla 18. Energía acumulada en función del porcentaje de huecos de las mezclas PA.	49
Tabla 19. Ensayo de sensibilidad al agua en las mezclas PA.	49
Tabla 20. Ensayo de pérdida de partículas.	50
Tabla 21. Valores del ensayo de escurrimiento.....	50

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de fin de grado es el resultado de las actividades llevadas a cabo dentro del Grupo de Caminos de Santander (GCS).

Según lo recogido en la directiva europea 2008/98/EC todos los estados miembros deben adoptar las medidas necesarias para reutilizar o reciclar, al menos, el 50% del plástico, el papel, el metal y el vidrio de los residuos domésticos o similares antes del año 2020. Asimismo también trata el concepto end-of-waste, el cual define a los materiales provenientes de la construcción y la demolición, algunas cenizas y escorias, la chatarra y los neumáticos fuera de uso como recursos y no como residuos [1].

Debido a la creciente necesidad de respetar el medio ambiente, a la redacción de nuevas normativas internacionales más restrictivas y a una población mundial cada vez más concienciada con este problema, es de vital importancia desarrollar nuevas aplicaciones para los residuos, las cuales reduzcan la huella humana y mejoren la sostenibilidad ambiental. Hoy en día el consumo de áridos naturales representa la segunda materia más consumida por el hombre, ocupando el agua el primer puesto [2]. Por todo esto, y debido al gran consumo de materiales y energía necesarios para el desarrollo de obras lineales, es prioritario el desarrollo de técnicas para la ejecución de estas que reduzcan los impactos ambientales generados y acerquen la obra pública al campo de la ingeniería sostenible.

El objetivo de este trabajo de fin de grado es el de evaluar técnicamente la viabilidad de la reutilización de escoria blanca de alto horno como árido fino en mezclas bituminosas, tanto en hormigones bituminosos (AC) como en mezclas porosas (PA).

2. ESTADO DEL ARTE

1.1.Introducción

Se define como mezcla bituminosa a la mezcla formada por la combinación de áridos, polvo mineral, betún asfáltico, y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. En el caso de las mezclas bituminosas calientes, tanto el proceso de fabricación como la puesta en obra deben realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente, oscilando la temperatura de fabricación de estas mezclas entre los 140 °C y 180 °C, y la de extendido algo menor, entre 120 °C y 140 °C.

Este trabajo se focaliza en el comportamiento de las mezclas para capa de rodadura. Dicha capa es la que entra en contacto con los vehículos y los agentes climáticos, y debido a esto, debe cumplir unas especificaciones que serán determinantes para el buen comportamiento del pavimento. Concretamente, este estudio se centra en las posibilidades de sustituir el árido fino y el filler dentro de un hormigón AC y una mezcla PA por escoria blanca de horno de arco eléctrico.

España, aun siendo el segundo país europeo por longitud de su red de carreteras, ha pasado de ser el segundo país europeo productor de asfalto (2008) a ocupar hoy la séptima posición según cifras presentadas por la EAPA en el ejercicio 2017 (15,2 millones de toneladas) por detrás de Alemania (42), Turquía (46,9), Francia (33,7), Italia (23,7), Gran Bretaña (22,7) y Polonia (19). [3]

Según datos de la ASEFMA, en el ejercicio económico 2018 el consumo de betún para mezclas asfálticas ha aumentado un 5,6% respecto al ejercicio anterior, suponiendo 16,1 millones de toneladas, pudiéndose considerar como un dato positivo ya que la producción de asfalto en España cayó a mínimos históricos en 2016. Sin embargo, este aumento no debe interpretarse como el inicio de la recuperación, ya que España necesitaría una producción de asfalto dos veces superior atendiendo a elementos como tráfico y longitud de red, entre otros. Las perspectivas para el 2019 son, sin embargo, más favorables. [4]

1.2.Mezclas calientes para capas de rodadura

La capa de rodadura (ilustración 1) debe cumplir unos requisitos mínimos tanto a nivel funcional como estructural, por eso ha de presentar una correcta regularidad superficial, así como presentar una buena resistencia al deslizamiento, controlar los niveles de ruido al paso de los vehículos, y tener una adecuada resistencia frente a las deformaciones plásticas [5].

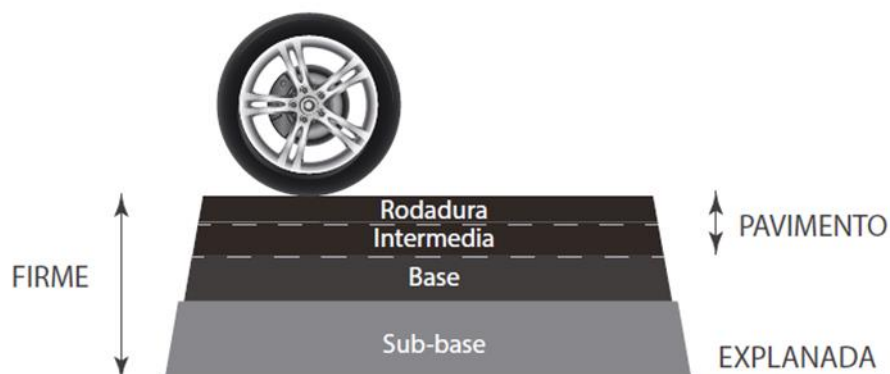


Figura 1. Sección tipo de una carretera compuesta por una mezcla bituminosa en España (Autor: Carlos Real).

Los tres tipos de mezcla bituminosa más significativos recogidos en la normativa española de Mezclas calientes para capas de rodadura son: mezclas porosas o drenantes (PA), mezclas discontinuas (BBTM) y hormigón bituminoso (AC), siendo las PA y AC las mezclas utilizadas en este trabajo.

• Hormigón Bituminoso (AC)

Los hormigones bituminosos son mezclas cerradas de granulometría continua, que en caso de utilizarse en la capa de rodadura tienen que cumplir con ciertas especificaciones recogidas en la norma[6]: han de presentar un tamaño máximo de áridos de 16 mm o 22 mm, con un porcentaje de huecos entre el 4 % y el 6 %, pudiéndose considerar, por lo tanto, como mezclas impermeables. Su espesor suele oscilar entre 4 cm y 6 cm según el tamaño máximo de árido, pudiendo tener en las capas de base o intermedias espesores mayores. Sobre mezcla, la proporción mínima de betún en peso es del 4,5 % (para áridos con una densidad media de 2,65 g/cm³).

De la producción total de mezclas bituminosas calientes y semicalientes AC en 2017, un 60,6% se utilizó en capa de rodadura.[7]

• Mezclas Porosas (PA)

Este tipo de mezclas se caracterizan por su alto contenido de huecos (superior al 20%), debido a ello se produce una considerable reducción del ruido que produce la rodadura de los vehículos, permitiendo también que el agua drene a través de ellas, impidiendo su acumulación en la superficie, mejorando en gran manera la seguridad del firme ya que minimizan tanto el riesgo de aquaplaning de los vehículos como el spray que levantan estos a su paso.

Estas mezclas se emplean como capa de rodadura, utilizando generalmente un betún modificado para mejorar su cohesión y minimizar la pérdida de partículas, que supone el principal inconveniente de este tipo de mezclas. Presentan un espesor que varía entre 4 cm y 5 cm. Su

proporción mínima de ligante sobre mezcla es del 4,3 % (para áridos con una densidad media igual que para las PA).

El ámbito de aplicación de estas mezclas suele ser en zonas lluviosas no muy frías, no siendo posible su utilización en carreteras de alta montaña, no tanto por los problemas de circulación que puedan generar sino por la baja durabilidad de las mezclas, debido sobre todo al mantenimiento (un ejemplo son las máquinas quitanieves, que con la cuchilla producen unos esfuerzos grandes a la carretera). En túneles con una longitud mayor de 1 km se deben emplear pavimentos de hormigón o tomar medidas de seguridad complementarias [8], en cualquier caso se aconseja no emplearlas en ningún supuesto (un derrame accidental de hidrocarburos provocaría que el combustible se introdujese bajo la capa porosa, multiplicando el riesgo en caso de incendio).

De la producción total de mezclas bituminosas calientes y semicalientes PA en 2017, un 10,5% se utilizó en capa de rodadura.[7]

1.3.Sostenibilidad ambiental en la construcción de carreteras

El deterioro de la red viaria, además de efectos económicos muy desfavorables, también presenta consecuencias negativas para el medio ambiente, aumentando el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Así, Juan José Potti, presidente de la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), ha manifestado su preocupación por la muy escasa actividad en la conservación de los firmes en las Comunidades Autónomas.[4]

Analizando el ciclo de vida útil de una carretera, el mayor impacto ambiental se produce durante la fase de la extracción y producción de los materiales. A lo cual hay que añadir que el mayor de los costes en la fabricación de una mezcla bituminosa los suponen los materiales (aproximadamente un 70% del coste total, tal como se refleja en la Figura 2 [9]).

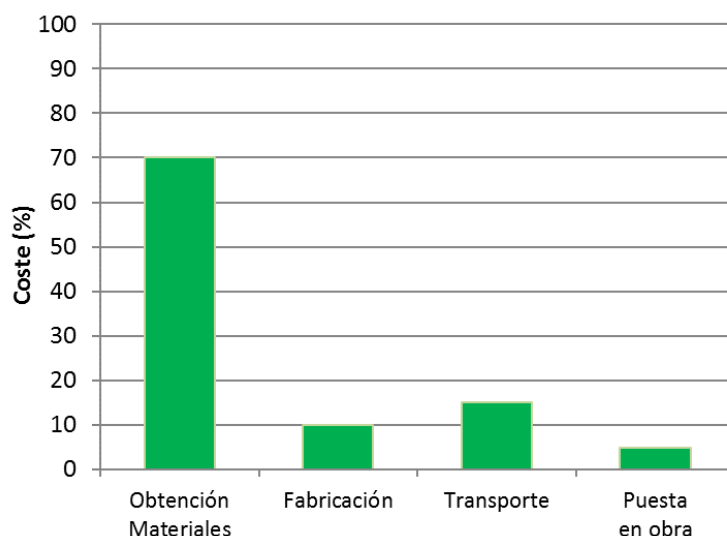


Figura 2. Costes asociados a la construcción de una mezcla bituminosa.

Debido a esto, el uso de áridos reciclados supondría una mejora tanto económica como medioambiental.

1.3.1. Uso de materiales reciclados

Las mezclas bituminosas suponen una puerta abierta a la hora de reutilizar sub-productos industriales como las escorias de acería. Habitualmente, se emplean escorias negras (árido siderúrgico) en las mezclas bituminosas, dadas sus buenas propiedades mecánicas. No obstante, en este trabajo se analizará el uso de escoria blanca, mucho menos extendido. A continuación, se presentan las principales propiedades de estos tipos de subproductos.

- **Escoria negra de horno de arco eléctrico**

Actualmente, gracias a la reducción del coste de producción, a la disminución del tiempo de producción, y a que no producen gases de combustión, los hornos de arco eléctrico son cada vez más utilizados sustituyendo a los altos hornos en la fabricación del acero. [10]

El funcionamiento de dichos hornos es el siguiente: durante una primera fase de fusión se produce la oxidación de la carga (mayoritariamente chatarra, añadiéndose también otros elementos para lograr un proceso de fusión adecuado como, por ejemplo, escorificantes y fundentes) mediante electrodos conectados a la corriente eléctrica, que aplican una corriente de baja tensión y alta intensidad. Durante esta primera etapa se produce la escoria negra. Seguidamente se integran elementos desulfurantes, reductores, o recarburantes y aleantes, y da

comienzo una segunda etapa reductora en la que se produce la escoria blanca (etapa de afino), tras la cual se obtiene el acero líquido. [11]

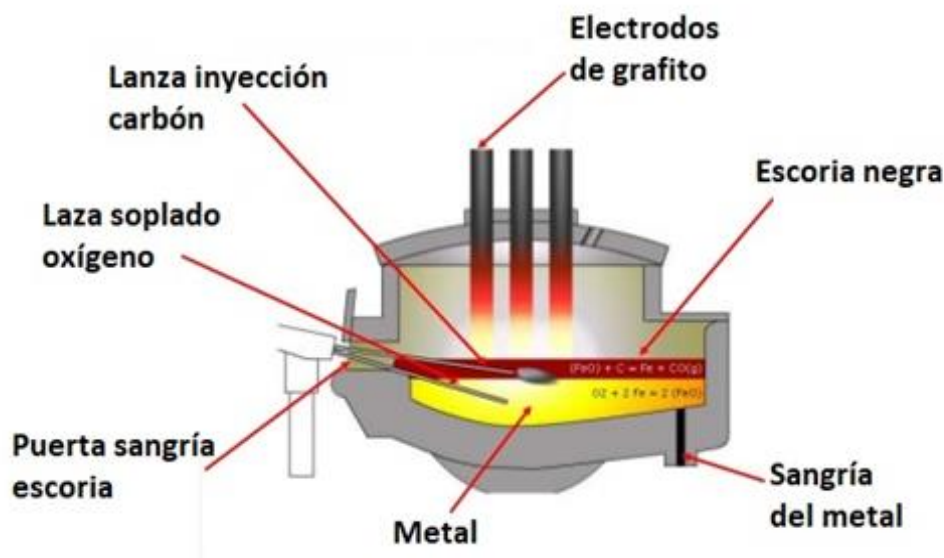


Figura 3. Esquema de horno de arco eléctrico

A nivel mundial, la escoria negra de horno de arco eléctrico es ampliamente reutilizada, habiéndose llegado a vender en 2011 en Estados Unidos, por 257 millones de dólares, 15,4 millones de toneladas. Las cuales fueron destinadas a las siguientes áreas de trabajo:

Utilización	%
Hormigón bituminoso	12,1
Capas de rodadura y capas de base	46,8
Material de relleno	19,3
Clinker	4,7
Otros	17,1

Tabla 1. Porcentaje de escoria de acería en EE.UU. en función de su uso ([12])

En el estado español no existe ley alguna que regule el uso de esta escoria a nivel estatal, habiendo, sin embargo, tres normativas (País Vasco, Cataluña y Cantabria) que permiten la utilización de escoria negra en mezclas bituminosas, siempre y cuando no supongan un peligro para el medio ambiente debido a sus niveles de lixiviados.



Figura 4. Escoria negra de horno de arco eléctrico [13]

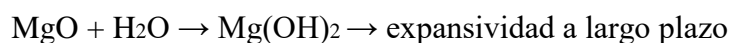
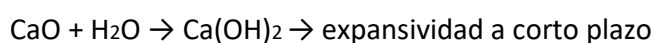
El Decreto 104/2006 regula en Cantabria la valorización de la escoria. En esta norma viene definida la escoria negra como un material apto para su utilización en carreteras como capa de pavimento de mezcla bituminosa, siempre que cumpla unos parámetros medioambientales y técnicos [14]. Algo similar ocurre con la normativa en el País Vasco y Cataluña, estos decretos definen los niveles máximos de lixiviados que puede alcanzar una escoria para poder utilizarse, debiéndose enviar a vertedero si sobrepasa los mismos. La siguiente tabla recoge los valores máximos especificados en cada caso [15] [16].

	Decreto 34/2003 (País Vasco)	Decreto 104/2006 (Cantabria)	Decreto 32/2009 (Cataluña)
Parámetro	mg/kg de materia seca	mg/kg de materia seca	mg/kg de materia seca
Bario	17	20	20
Arsénico	-	0,5	0,5
Cadmio	0,009	0,04	0,04
Cobre	-	2	2
Cromo total	2,6	0,5	0,5
Mercurio	-	0,01	0,01
Níquel	0,8	0,4	0,4
Plomo	0,8	0,5	0,5
Zinc	1,2	4	4
Molibdeno	1,3	0,5	0,5
Selenio	0,007	0,1	0,1
Antimonio	-	0,06	0,06
Cloruro	-	800	800
Fluoruro	18	10	18
Sulfato	377	1000	1000
Índice de fenol	-	1	-
COD	-	500	-
STD	-	4000	-
pH	-	-	-

Tabla 2. Valores máximos de lixiviados admisibles.

Como podemos observar en la tabla 2, la normativa de Cantabria es la que aporta más variables a controlar, coincidiendo con Cataluña salvo porque añade también el índice de Fenol, el COD (Carbono Orgánico Disuelto) y el STD (Sólidos Totales Disueltos). Por otro lado, la legislación del País Vasco difiere de las anteriores en que es mucho más restrictiva respecto a los valores de Cadmio, Zinc y Selenio; pero más permisiva en Cromo, Níquel, Plomo, Molibdeno y Fluoruro; no controlando el nivel de Arsénico, Cobre, Mercurio, Antimonio y Cloruro.

La expansividad de la escoria negra es un hándicap para su uso, aunque no llega a los niveles de la escoria blanca. La escoria contiene óxido de magnesio y óxido de calcio que cuando entran en contacto con el agua dan lugar a hidróxidos, los cuales se expanden y disgregan el material.



De esta forma, existen diversos métodos de tratamiento para la estabilización volumétrica de la escoria, siendo los más utilizados los siguientes [17]:

- Determinación del contenido de CaO libre de la escoria en fase líquida y, en función de ello, separarla en diferentes balsas de almacenamiento. Se sugiere un valor límite del 4% de CaO libre como criterio de separación.
- Hidratar el CaO y el MgO mediante el envejecimiento de la escoria en pilas expuestas a la intemperie. Acelerando dicho proceso en algunos casos mediante aspersores que rocían agua sobre las pilas.
- Curación de la escoria utilizando vapor de agua el cual acelera el envejecimiento.
- Incorporación de materiales silicosos e inyección de oxígeno a la escoria líquida, en una olla independiente del proceso de fabricación.

Sin embargo el método escogido para la realización de la hidratación no es tan importante como el hecho de llevarla a cabo, pues según algunas investigaciones, no hay cambios significativos en las cantidades de CaO y MgO libre independientemente del método utilizado.

Para la utilización de escorias en mezclas bituminosas bastaría con un proceso de curado sencillo y de bajo coste que asegure una escoria homogénea y estable en el tiempo. Un ejemplo de dicho proceso es el siguiente [18]:

- Triturar la escoria hasta un tamaño adecuado en función del uso que se le vaya a dar a ésta.
- Separación magnética de las partículas de hierro que pudiera contener.
- Depositar la escoria en una piscina de riego, donde se rocía con agua de 30 a 90 días para hidratarla.

Una vez se le ha aplicado el adecuado proceso de curado la escoria negra tiene grandes posibilidades como árido en obras lineales, sobre todo en la capa de rodadura, gracias a que

presenta una buena resistencia a la abrasión, fragmentación y compresión, son partículas duras con bajos coeficientes de los ángeles (17 - 25) y alto coeficiente de pulimento acelerado (0,50 – 0,60) [19].

Su mayor inconveniente es su alta densidad (de entre 3,1 y 4,5) [19], que puede llegar a penalizar el impacto económico y medioambiental de la mezcla bituminosa debido al coste que supone su transporte.

En el año 2010 se llevó a cabo un estudio de mezclas bituminosas de base con una granulometría similar a las AC22. Se llevaron a cabo pruebas de fatiga, módulo resiliente, sensibilidad al agua y deformación plástica sobre una mezcla compuesta por un 51% de escoria negra, empleando a su vez dos betunes diferentes en función de su contenido de SBS (estireno-butadieno-estireno). Los resultados mostraron mejoras en todos los campos de referencia siendo más notables en aquellas que empleaban un betún altamente modificado [20].

Dos años más tarde, en el 2012, se realizó una investigación en donde se comparaba el uso de la escoria sustituyendo completamente el árido natural de la fracción fina o a la gruesa en mezclas bituminosas de rodadura SMA (Stone Mastic Asphalt) con betún modificado con SBS. Los resultados mostraron que en las probetas donde se había utilizado la escoria como árido grueso mejoraban los resultados de estabilidad Marshall, tensión indirecta y módulo resiliente, con respecto a las mezclas de referencia, consiguiendo mejores resultados de estabilidad, sensibilidad al agua, y resistencia frente a deformaciones plásticas [21].

Por lo general, los estudios demuestran que los mejores resultados se obtienen utilizando la escoria como árido grueso, fortaleciendo el esqueleto mineral de la mezcla.

A nivel de comunidad autónoma, en Cantabria la escoria negra en capa de rodadura se ha utilizado en dos carreteras interurbanas, la CA-136 que une las localidades de Puente San Miguel y Suances, y la CA-137 que es la variante de Santillana del Mar. Se ha empleado también en la Avda. de Los Castros, una carretera urbana situada en Santander, frente a la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, mostrando un buen comportamiento y encontrándose en la actualidad en perfecto estado.



Figura 5. Aplicación de escoria negra en subbase. Urbanización en Reocín.

• Escoria blanca

Como ya se ha especificado, esta escoria se produce durante la fase de afino de la producción del acero, donde el metal fundido procedente del horno eléctrico pasa al horno-cuchara donde se lleva a cabo la desoxidación, mediante la cual se eliminan los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descaburación del acero. En este horno cuchara el acero fundido se cubre con una escoria denominada escoria blanca y se agita de forma continuada mediante el soplado de gas inerte (comúnmente argón). Esta escoria blanca reduce los óxidos metálicos presentes en el baño, durante la denominada fase de desoxidación. A su vez se lleva a cabo la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca.

Ensayos químicos efectuados en nuestro país establecen los siguientes valores medios de lixiviados para las escorias blancas de acería:

Parámetro	%	Parámetro	%
SiO ₂	14,7-19,3	Fluoruro (%)	1,4
Fe ₂ O ₃	1,1-3,6	Sulfuro (mg/kg)	503
FeO	0,0-0,95	Zinc (ppm)	596
Al ₂ O ₃	3,2-10,4	Plomo (ppm)	84
CaO	45,3-62,1	Cobre (ppm)	200
MgO	4,5-17,2	Cromo (ppm)	150
MnO	0,0-1,2	Níquel (ppm)	80
S	1,45-1,65		
C	0,0-0,03		

Tabla 3. Valores medios de lixiviados de los áridos procedentes de escorias blancas [13]

Esta escoria presenta una granulometría que mayoritariamente pasa por el tamiz 2mm, por lo que se complementa muy bien con la escoria negra. Sin embargo, no tiene un uso extendido en mezclas asfálticas debido a los problemas asociados a su alta expansividad, por lo que se hace todavía más importante llevar a cabo un proceso adecuado de hidratación.

Hasta la fecha, este tipo de escoria se ha utilizado en la obra civil en la fabricación de morteros. Tras 6 o 10 semanas de enfriamiento a la intemperie en zonas húmedas, la escoria blanca pierde casi totalmente su expansividad, convirtiéndose en un material útil para los morteros. Su utilización en lugar de ciertos componentes o aditivos supone un ahorro económico así como una optimización de los recursos.

En la siguiente figura se observa la escoria blanca una vez tamizada.

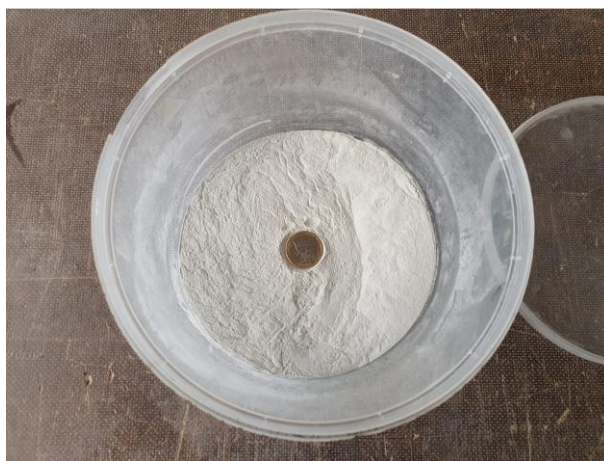


Figura 6. Filler de escoria blanca.

Sin embargo, rara vez se han utilizado para la realización de mezclas bituminosas, razón por la cual se realiza esta investigación.

En 2016 se realizó una investigación acerca del impacto ambiental producido por el uso de este tipo de escoria en el campo de la construcción. Para ello emplearon escoria negra de arco eléctrico y escoria blanca procedente de una acería de Victoria, Australia. Además de la caracterización granulométrica y el ensayo Los Ángeles, se realizó un ensayo de lixiviados y un test de concentración total con el fin de clasificar el riesgo ambiental de estos áridos según las especificaciones de la Environmental Protection Authority (EPA) [22].

Los resultados de estos ensayos demostraron que el uso de estas escorias como áridos en obra civil no implica riesgos ambientales ni problemas de lixiviación. Mediante la comparación con la EPA, estas escorias se clasificaron como desechos sólidos inertes.

Contaminantes	Escoria blanca	Escoria negra	Valores permitidos	
			Residuos sólidos inertes	Material de relleno
Arsénico	<2,0	<2,0	500	20
Cadmio	1,3	7,4	100	3
Cromo	450	3300	500	1
Cobre	97,0	260	5000	100
Plomo	49,0	25,0	1500	300
Mercurio	<0,1	<0,1	75	1
Níquel	15,0	22,0	3000	60
Zinc	490	190	35000	200
Cianuro	<5,0	<5,0	2500	50

Todos los datos están expresados en miligramos por kilo (mg/kg)

Tabla 4. Resultado de los valores de la concentración total de ambas escorias comparados con los valores de la EPA[22]

También se realizó una comparación entre los lixiviados de las escorias y el estándar de agua potable, cuyos resultados indicaron que todos los contaminantes se encontraban completamente dentro de los límites permitidos [22], considerándose, según la EPA, un lixiviado como peligroso si este contiene un metal con una concentración 100 veces superior a la de estándar del agua potable. A la vista de todos estos resultados podemos concluir que el uso de escoria blanca como árido en obra civil es una alternativa viable medioambientalmente hablando.

En el 2016 también se llevó a cabo una investigación de mezclas bituminosas PA, en las cuales se sustituyó el árido fino y el filler por escoria blanca. En dicha prueba se diseñaron dos mezclas, una con los componentes estandarizados de referencia y otra con la escoria blanca. Se realizaron ensayos por triplicado de contenido en huecos, Evaluando su comportamiento mecánico tanto en mezcla nueva como envejecida, realizando en ambos casos el ensayo Cántabro a diferentes temperaturas. Comprobando además el impacto del agua, analizando la resistencia conservada mediante la rotura de las probetas a tracción indirecta y cántabro húmedo.

De los resultados de dichos ensayos se obtuvieron las siguientes conclusiones [23]:

- 1) El contenido de huecos de las mezclas fue ligeramente más alto, lo que puede deberse a la angulosidad superior de la escoria.
- 2) Los resultados medios de permeabilidad también fueron muy cercanos a los de las mezclas de referencia.
- 3) La prueba de escurrimiento del ligante demostró que la escoria blanca funciona correctamente como filler, presentando buena adherencia con el betún, formando mástico de buena calidad. También se observó que la escoria blanca presentaba una absorción de betún superior a la convencional.

- 4) El comportamiento mecánico de las mezclas con escoria blanca fue excelente para cada mezcla diseñada, lo que permite utilizar estas mezclas incluso en las más exigentes aplicaciones. Sin embargo estas mezclas fabricadas con escoria blanca mostraron un rendimiento ligeramente peor a las de referencia.
- 5) Las mezclas con escoria blanca y las de referencia presentaron comportamientos similares frente al envejecimiento.
- 6) Se produjo una mejora de la susceptibilidad térmica de las mezclas.
- 7) La permeabilidad apenas cumplió con la normativa vigente, aunque esto puede no ser significativo para las mezclas PA. También presentaban un incremento de la cohesión gracias a la incorporación de escoria blanca. La textura más áspera de la escoria y su mejor adherencia con el aglutinante favorece la susceptibilidad a la humedad de las mezclas.

En 2017 se realizó una investigación de mezclas AC, en las cuales se sustituyó el filler por escoria blanca. Analizando sus propiedades volumétricas y realizando ensayos de módulo resiliente, tracción indirecta, SCB (semi-circular bending test), permeabilidad al agua y de escurrimiento. De los resultados de dichos ensayos se obtuvieron las siguientes conclusiones[24]:

- 1) El contenido óptimo de betún, que permitió cumplir con la especificación italiana fue igual a un 5.1% en peso de mezcla para la mezcla con escoria blanca.
- 2) La mezcla con escoria blanca tuvo un mayor módulo y resistencia a tracción indirecta que la mezcla de referencia, mientras que la energía total de fractura (TFE) durante el ensayo de tracción indirecta de las dos fue similar. Esto denota que la escoria blanca hidratada conduce a un aumento de la rigidez y la resistencia, pero no aumenta su fragilidad a temperaturas intermedias. Por otra parte, la mezcla de escoria blanca mostró una baja sensibilidad al agua en términos de resistencia conservada. A continuación en la Figura 7 se muestran los valores del módulo resiliente, tracción indirecta y TFE de las mezclas de referencia y escoria blanca.

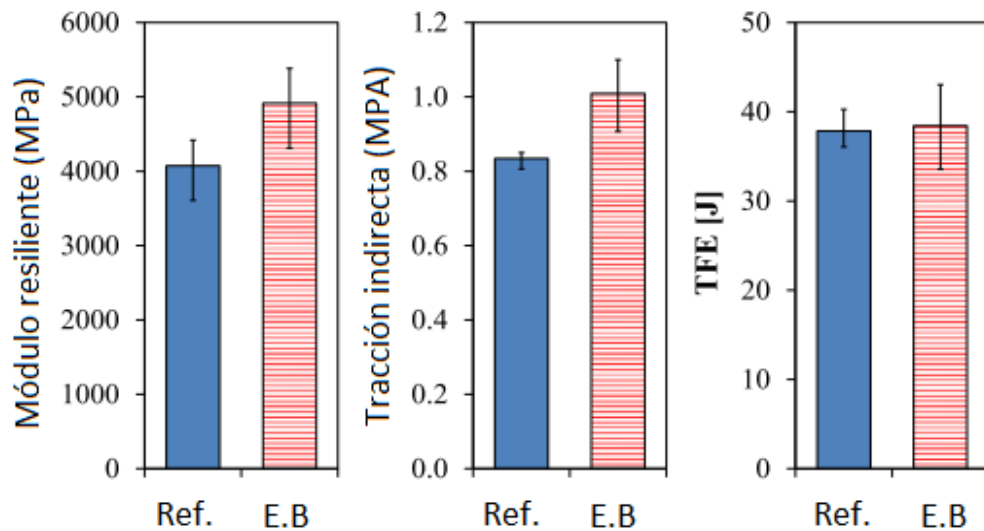


Figura 7. Resultados de los ensayos de módulo resiliente, tracción indirecta y TFE en ambas mezclas

- 3) Los resultados del ensayo SCB como se muestra en la Figura 8, mostraron un rendimiento a 0°C similar al de la muestra de referencia, lo que indica que se evita el riesgo de que presente un comportamiento frágil a bajas temperaturas.

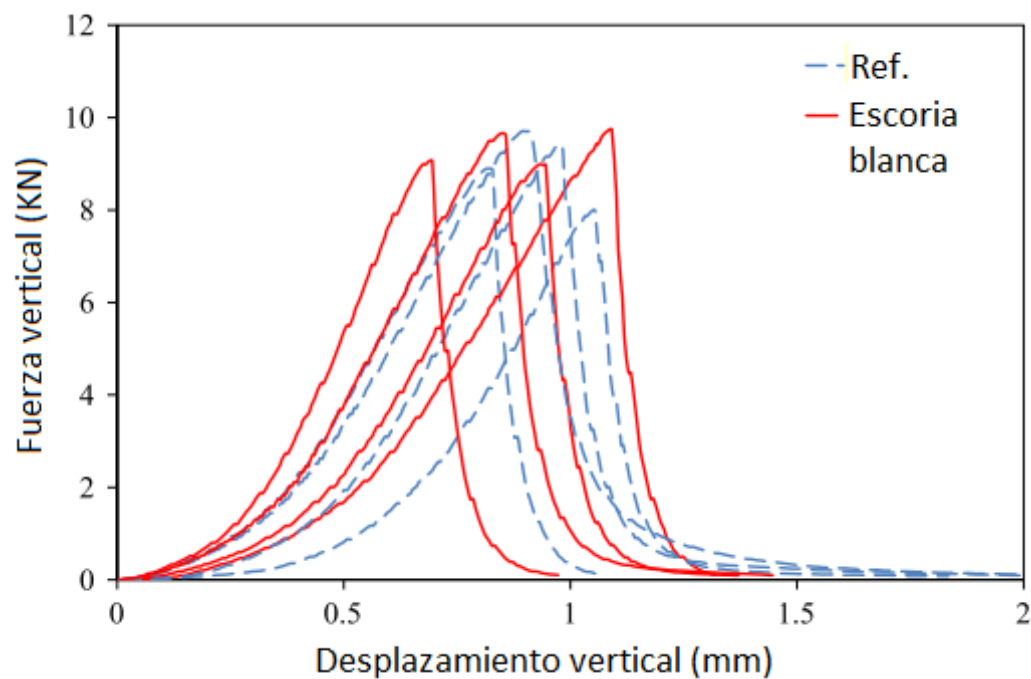


Figura 8. Resultados del ensayo SCB.

- 4) La mezcla con escoria blanca presento una excelente resistencia a fatiga, particularmente a cargas cíclicas de deformación.

Por todo ello se llegó a la conclusión de que es perfectamente factible el uso de escoria blanca en mezclas bituminosas en caliente.

• Otros usos de los subproductos industriales

Hasta la actualidad se han llevado a cabo investigaciones acerca del empleo de escorias blancas y negras en la estabilización de suelos y capas de firmes de caminos rurales[25], el empleo de escoria negra en hormigones estructurales[26] y la corrosión de armaduras embebidas en morteros elaborados con escorias blancas[27].

Sin embargo, el principal uso de estos subproductos industriales es su reutilización en la fabricación de morteros de albañilería, pudiéndose incluso emplear de forma conjunta escoria negra y blanca como sustituyente de los áridos naturales, como demostró en su tesis doctoral Isabel Santamaría Vicario [28]. Para la fabricación de estos morteros fue necesaria la utilización de aditivos retenedores de agua o aireantes-plastificantes, ya que estos morteros presentaban una gran exudación de agua. La sustitución de los áridos por escorias conllevó a un aumento de la densidad del mortero en estado fresco y endurecido, una disminución del tiempo de utilización, una mejora de su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos de flexión y compresión, presentado sin embargo una adherencia menor que los morteros de referencia.

En la siguiente figura se puede apreciar como los valores de retención de agua son prácticamente iguales en cada serie de estudio, independientemente del árido empleado.

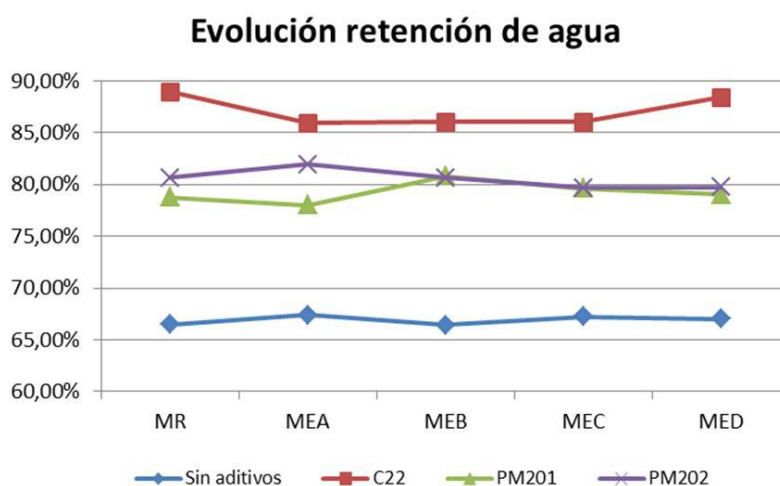


Figura 9. Evolución retención de agua en función del aditivo empleado.[28]

Los morteros dosificados con escorias negras y blancas presentaron un buen comportamiento en los ensayos de durabilidad, presentando todas las mezclas una resistencia a compresión después de los ensayos de envejecimiento acelerado superior a 5N/mm².

Económicamente hablando, el coste de estos morteros con escoria resulta viable en los casos en que la central de producción de escorias se encuentre a menos de 100 kilómetros, dejando de ser competitivos a partir de los 200 kilómetros.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En este apartado se recogen las principales propiedades y procedencias de los materiales empleados en este trabajo. Los ensayos realizados sobre cada uno de ellos dependieron de su función. Los materiales utilizados son árido ofídico en la fracción gruesa, caliza como fracción fina y escoria blanca para el filler.

Seguidamente se presentan las características principales de cada material.

3.1. Áridos naturales

Los áridos naturales utilizados han sido árido ofídico en la fracción gruesa y caliza en la fracción fina.

Sus características vienen recogidas en la siguiente tabla:

ÁRIDO	ENSAYO	RESULTADO	NORMA
<u>Ofita</u>	Índice de lajas	< 1 %	UNE-EN 933-3
	Los Ángeles	14	UNE-EN 1097-2
	Densidad	2,794 g/cm ³	UNE-EN 1097-6
<u>Caliza</u>	Equivalente de arena	78	UNE-EN 933-8
	Densidad	2,725 g/cm ³	UNE-EN 1097-6

Tabla 5. Caracterización de los áridos naturales

En la siguiente figura se puede observar la granulometría de la caliza.

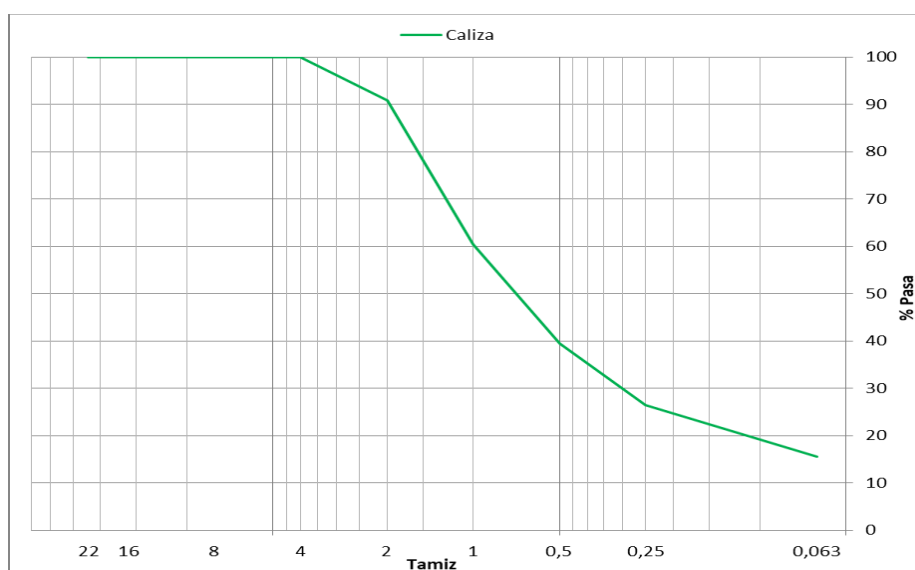


Figura 10. Granulometría del árido calizo

3.2. Áridos alternativos

Para reemplazar el árido fino de las mezclas se utilizó escoria blanca de arco eléctrico procedente de una acería del norte de España. Esta escoria blanca, la cual ha sufrido un proceso de hidratación, presenta las siguientes características:

ÁRIDO	ENSAYO	RESULTADO	NORMA
<u>Escoria blanca</u>	Densidad (g/cm^3)	2,946	UNE-EN 1097-6
	Hinchamiento (%)	0,02	UNE 103502

Tabla 6. Caracterización de los áridos alternativos

A continuación, en la ilustración 9 se muestra el estado de la escoria blanca una vez finalizado el proceso de hidratación, así como su granulometría según el ensayo EN 933-1 (Figura 10).



Figura 11. Escoria blanca tras el ensayo de hinchamiento

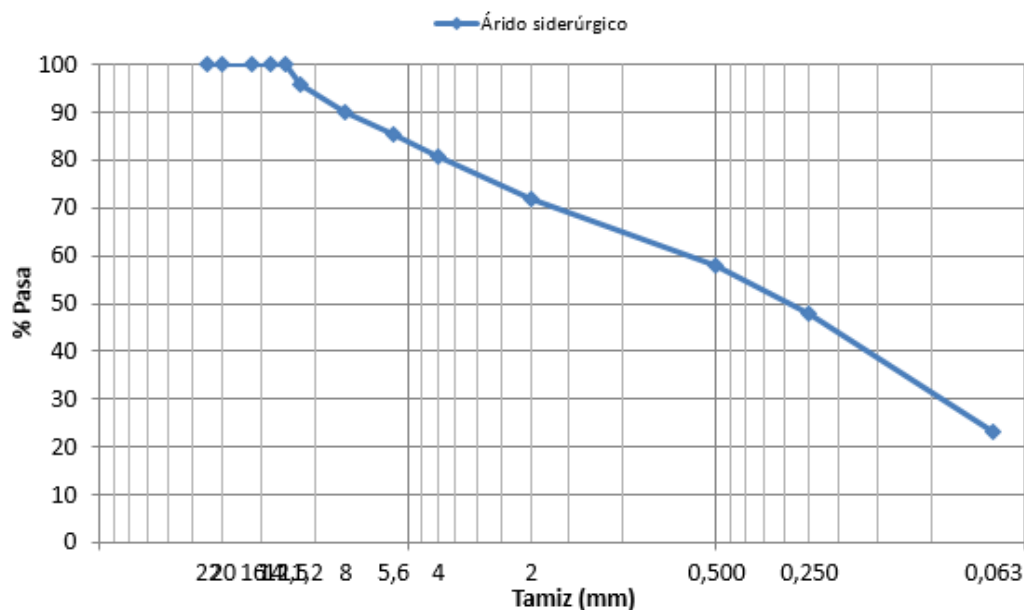


Figura 12. Granulometría escoria blanca

3.3.Ligante

Para analizar el comportamiento de la escoria blanca se utilizó, en las mezclas AC, un betún convencional 50/70 con una densidad de 1,035 g/cm³ (UNE-EN 15326), con una penetración de 57 dmm (UNE-EN 1426) y una temperatura de reblandecimiento de 51,6 °C (UNE-EN 1427), y en las mezclas PA un betún modificado con polímero PMB 45/80-65, con una densidad de 1,028 g/cm³ (UNE-EN 15326), con una penetración de 49,5 dmm (UNE-EN 1426), una temperatura de reblandecimiento de 72,3 °C (UNE-EN 1427), y una recuperación elástica del 90 % (UNE-EN 13398).

4. METODOLOGÍA

En esta investigación se decidió inicialmente diseñar mezclas para capa de rodadura, reemplazando tanto el árido fino como el filler por escoria blanca de horno de arco eléctrico, buscando así un uso para este subproducto de la fabricación del acero.

Para ello se diseñaron dos mezclas de referencia de cada tipo (AC y PA) con los áridos convencionales y un porcentaje óptimo de betún. Sustituyendo posteriormente, en las probetas a ensayar, tanto el árido fino como el filler natural por escoria blanca.

Sin embargo durante la fase de amasado de las probetas, se comprobó que la escoria blanca presenta una resistencia a la fragmentación muy baja disgregándose las partículas de mayor tamaño, modificando la granulometría final de la mezcla. Esto fue debido a que no se realizó un ensayo Los Ángeles porque su granulometría hace inviable tamizar una muestra suficiente de material para este ensayo (ya que la cantidad de material disponible era limitada). Por todo ello se optó por la utilización de dicha escoria solamente como sustituyente del filler, priorizando que tuviera una buena cohesión con el betún sobre sus propiedades mecánicas.

Se pretende que las mezclas experimentales diseñadas se puedan utilizar en la misma situación, zona climática o categoría de tráfico que las de referencia. Partiendo siempre de la idea de que las mezclas experimentales mantengan el comportamiento mecánico de la de referencia.

Tanto para el diseño de las mezclas de referencia, como las experimentales, se muestran a continuación los ensayos realizados según la normativa española para este tipo de mezclas [6]:

4.1. Contenido en huecos

Con este ensayo se calculó la densidad de la muestra y el contenido de huecos (UNE-EN 12697 – 8), siendo el primer parámetro de diseño a considerar para la realización de una mezcla. En la siguiente tabla se expresan los valores definidos por el PG-3 para las mezclas AC y PA:

	AC				PA
Tráfico	T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4	-
Huecos	4 – 6 %		3 – 5 %		≥20%

Tabla 7. Porcentaje de huecos para mezclas AC y PA.

Así mismo en las mezclas AC se podrá exigir el contenido de huecos en áridos, de acuerdo con el método de ensayo de la norma UNE-EN 12697-8 indicado en el Anexo B de la norma UNE-EN 13108-20, siempre que, por las características de los mismos o por su granulometría combinada, se prevean anomalías en la fórmula de trabajo. En tal caso, el contenido de huecos en áridos, de mezclas con tamaño máximo de dieciséis milímetros ($D = 16 \text{ mm}$) deberá ser mayor o igual al quince por ciento ($\geq 15 \%$), y en mezclas con tamaño máximo de veintidós o

de treinta y dos milímetros ($D = 22 \text{ mm}$ o $D = 32 \text{ mm}$) deberá ser mayor o igual al catorce por ciento ($\geq 14 \%$) [6].

4.2. Determinación de la energía de compactación

Se llevó a cabo un ensayo de compactabilidad (UNE-EN 12697-10), el cual no aparece contemplado por el PG3, con una máquina giratoria Controls ICT 76-B0251. Se utilizaron moldes de 100 mm de diámetro, una presión de 600 KPa, una velocidad de rotación de 30 rpm y un ángulo de giro de $0,82^\circ$, obteniendo la variación de los huecos y del esfuerzo cortante en función del número de giros aplicado.

Una vez obtenidos dichos resultados se determinó el factor de compactabilidad K ajustando el porcentaje de huecos en función del número de giros:

$$H_i = H_1 - K \cdot \ln(N)$$

Ecuación 1. Variación del contenido de huecos en función de los giros.

En donde H_i representa el contenido de huecos en función de cada ciclo, H_1 (%) el contenido de huecos inicial, K la compactabilidad y N el número de giros.

También se utilizaron los valores de la altura y del cortante para calcular la energía acumulada de compactación por unidad de peso W (KJ/Kp), utilizando el modelo desarrollado por del Río [29].

$$\frac{W}{m} = 1 \sum_1^N \frac{W_i}{m} = \frac{2 * \pi * \theta * A}{m} \sum_1^N h_i * S_i$$

Ecuación 2. Energía de compactación requerida en función de la masa

En donde S_i (KN/m²) es el esfuerzo cortante medido en cada ciclo i, h_i (m) es la altura de la probeta en cada ciclo i, A (m²) es el área de la probeta, θ (rad) es ángulo de inclinación de la probeta cilíndrica, y N es el número de ciclos aplicados.

A continuación, en la Figura 12 se muestra la máquina empleada para el ensayo de compactabilidad.



Figura 13. Máquina giratoria ICT250 de Controls.

4.3. Adhesividad árido-ligante

Para la determinación de esta propiedad se ha realizado el ensayo de Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697 – 12) el cual evalúa la resistencia a tracción indirecta de probetas que han sido sumergidas en agua a 40 °C durante 72 horas, rompiéndose posteriormente a 15°C, frente a probetas del mismo tipo que han permanecido secas con el objetivo de determinar la pérdida de cohesión de las mezclas causada por la saturación del agua.

El PG-3 recoge las siguientes especificaciones para este ensayo en mezclas AC y PA:

Mezcla	AC	PA
Resistencia conservada (%)	≥ 85%	≥ 85%

Tabla 8. Especificaciones del ensayo de Sensibilidad al agua según el PG-3 para capa de rodadura.

4.4. Resistencia a las deformaciones plásticas

Este ensayo se realizó con una máquina INFRATEST, a 60 °C de temperatura y con una carga de 700 N, sobre dos probetas de 410 x 260 x 50 mm por ensayo.

Es una de las propiedades más importantes para mezclas AC, sobre todo en climas cálidos, puesto que limita la vida útil de la mezcla. Para la realización del estudio de la resistencia a deformaciones plásticas, se ha llevado a cabo el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697 – 22), en donde la susceptibilidad a deformarse se mide en función de la pendiente de la rodera que forma una rueda entre los ciclos 5.000 y 10.000 (1 ciclo equivale a 2 pasadas sobre la probeta). En mezclas AC la normativa considera obligatorio la realización de este ensayo.

	AC	
Tráfico	T00 a T1	T2, T3 y arcenes
Pendiente (mm / 10 ³ ciclos)	0,07	0,1

Tabla 9. Valores exigidos para las deformaciones plásticas del PG-3 en hormigones bituminosos

Seguidamente en la Figura 13 se muestra la máquina empleada para la realización del ensayo de pista.

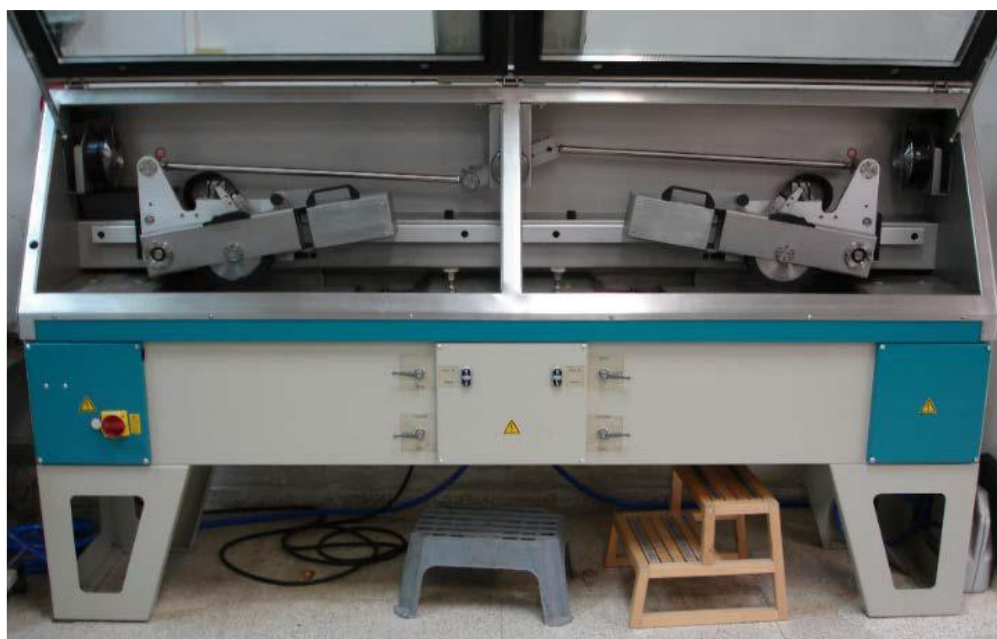


Figura 14. Máquina INFRATEST del ensayo de pista

4.5. Pérdida de partículas

También denominado ensayo Cántabro, el cual sirve para la determinación de la resistencia a la abrasión de las muestras drenantes, siendo por tanto de vital importancia la realización de este ensayo en las muestras PA ya que la pérdida de partículas es uno de los principales

inconvenientes de estas. A través de la realización de este ensayo es posible determinar el contenido mínimo de betún que ha de añadirse a la mezcla.

Para esta investigación se han realizado tanto el ensayo Cántabro en seco (EN 12697-17) como el húmedo (NLT – 362). En el Cántabro seco se han ensayado 4 probetas cilíndricas de mezcla bituminosa drenante, compactadas con el compactador de impacto aplicando 50 golpes/cara o giratoria compactadas con 40 giros. Estas probetas deben conservarse en una superficie plana durante al menos 2 días a una temperatura inferior a 25 °C, así como mantenerse acondicionadas en la cámara de ensayo a la temperatura definida, con una tolerancia de $\pm 2^\circ\text{C}$, durante un tiempo mínimo de 4 horas. La temperatura de ensayo tiene gran importancia en los resultados, siendo la recomendada entre 15 y 25 °C. No es un ensayo adecuado para temperaturas superiores a 35 °C. En España el ensayo se realiza a una temperatura de 25 °C. Para cada probeta se determina su masa y se introduce en la máquina de Los Ángeles la cual aparece representada en la Figura 14.



Figura 15. Máquina de Los Ángeles.

Se aplican 300 vueltas a una velocidad de 30 rpm a 33 rpm y se limpia la probeta ligeramente con un paño UNE-EN 12697-17:2007., anotando su masa. El resultado del ensayo corresponde a la pérdida de partículas de cada probeta tras la abrasión. El Cántabro húmedo no se encuentra actualmente recogido en la normativa UNE; sin embargo, sí formaba parte de la normativa NLT (362-92) y del PG-3 de 2004. En este ensayo se disponen las probetas 24 horas en un baño a 60 °C, y otras 24 horas más, en cámara a 25 °C. Siendo esta última la temperatura de ensayo.

En la siguiente figura podemos observar el estado de las probetas una vez realizado dicho ensayo.



Figura 16. Probetas de Cántabro seco y húmedo una vez ensayadas.

Para el cálculo de la pérdida de partículas de cada probeta tras la abrasión se empleó la fórmula siguiente:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

En donde:

P: representa la pérdida de partículas expresado en %.

P1: masa inicial de la probeta, en g.

P2: Masa final de la probeta en g.

Siendo los valores mínimos a cumplir en cada uno de los ensayos los representados en la siguiente tabla:

Característica	Categoría de tráfico pesado	
	T00 a T2	T3, T4 y arcenes
Pérdida de partículas (seco)	< 20%	< 25%
Pérdida de partículas (húmedo)	< 35%	< 40%

Tabla 10. PG-3: Anejo 543.5.1.5 y PG-3 (2004): Anejo 542.5.1.

4.6. Escurrimiento del ligante

En el caso de las mezclas drenantes (PA), como consecuencia de su falta de finos, es necesario realizar la comprobación de que no se produce escurrimiento del betún. Este ensayo nos da un valor límite del contenido de ligante en este tipo de mezclas, permitiendo también valorar el efecto de la incorporación de aditivos modificadores del ligante bituminosos con respecto a la propiedad que se pretende medir.

Según la norma, se recogen dos metodologías diferentes a la hora de evaluar el exceso de ligante de una mezcla abierta: la primera, conocida como “método Schellenberg”, presenta un mayor complejidad y la segunda, la cual se ha utilizado en el desarrollo de este proyecto, consiste en medir la cantidad de betún escurrido tras alojar la mezcla drenante en una cesta perforada con agujeros de 3mm durante 3 horas a las siguientes temperaturas:

- 175 °C para betunes convencionales (25 °C más que la temperatura de mezclado).
- 180 °C para betunes modificados (15 °C más que la temperatura de mezclado).

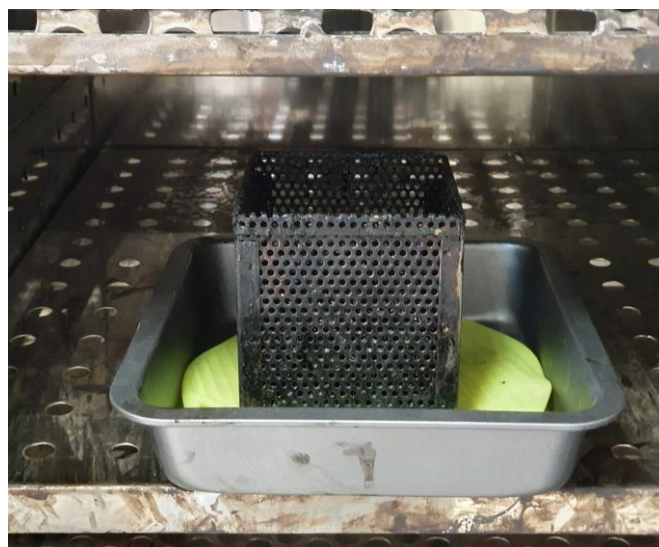


Figura 17. Cesta en horno durante la realización del ensayo.

El PG-3 no especifica ningún valor de escurrimiento el cual invalide la utilización de una mezcla, por tanto se tomará de la literatura y de las guías de buenas prácticas [30] [31], un contenido límite de betún escurrido a partir del cual la mezcla no es adecuada. Según las referencias citadas se utilizará un valor máximo de escurrimiento de un 0,3% de betún sobre mezcla, obtenido de la siguiente formula:

$$D = 100 * \frac{(W_2 - W_1)}{100 + B}$$

En donde:

D: representa el betún escurrido, en porcentaje (%).

W₁: masa inicial de la bandeja y el papel de aluminio, en gramos (g).

W₂: masa de la bandeja y el papel de aluminio, en gramos (g), conteniendo el material migrado.

B: representa la masa inicial de ligante contenido en la mezcla, en gramos (g).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados, primeramente los de referencia y a continuación los obtenidos por las experimentales. Estos ensayos se dividirán en dos grupos en función de cada tipo de mezcla realizada (AC y PA) ya que el objetivo de esta investigación es observar el impacto de la escoria blanca en las propiedades mecánicas de cada mezcla comparando los resultados con los valores especificados en el PG-3 para ver en qué tipo de carreteas podría emplearse la mezcla experimental.

5.1. Mezclas AC

5.1.1. Caracterización granulométrica

Como se ha comentado con anterioridad, la idea inicial de este proyecto era evaluar la escoria blanca como sustituyente del árido fino y del filler para mezclas AC, descartándose esta idea ya que durante la fabricación de la mezcla la escoria blanca se rompía, cambiando su tamaño e incrementando la fracción fina. Esto se comprobó mediante la realización de una nueva probeta y una granulometría recuperada, cuyos resultados se pueden observar en la siguiente Figura.

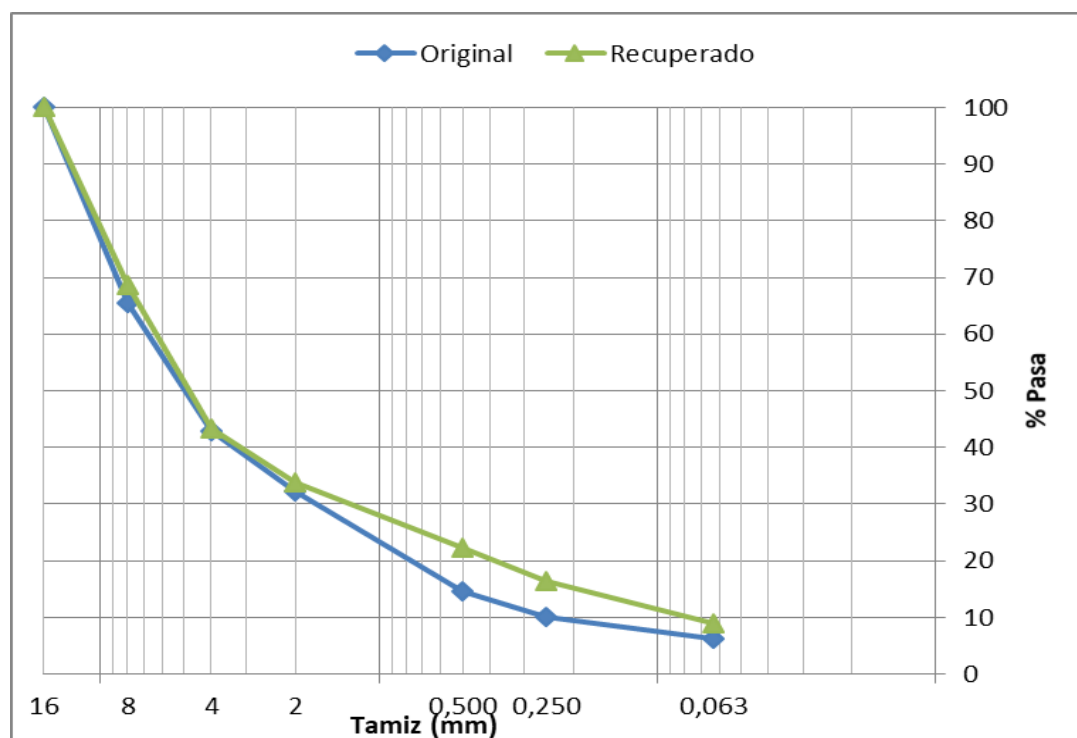


Figura 18. Granulometría recuperada en las probetas con escoria blanca como árido fino.

Este cambio en la granulometría, aunque parezca pequeño, reduce la resistencia del esqueleto mineral e incrementa el porcentaje de mortero en la mezcla, impidiendo de esta manera el correcto comportamiento de la misma.

A continuación se procede a analizar los resultados de los ensayo realizados con escoria blanca como sustituyente solamente del filler.

Como se puede apreciar en las Figura 18 la granulometría es la misma para la mezcla de referencia y la experimental, en donde se sustituye el tanto por ciento en peso de filler calizo por filler procedente de escoria blanca. Para este tipo de mezclas se ha utilizado en ambos casos un porcentaje de betún sobre mezcla de un 4,5%.

A continuación se muestran los ajustes granulométricos de las diferentes mezclas, tanto las de referencia como aquellas con escoria blanca, junto con los máximos y mínimos admisibles.

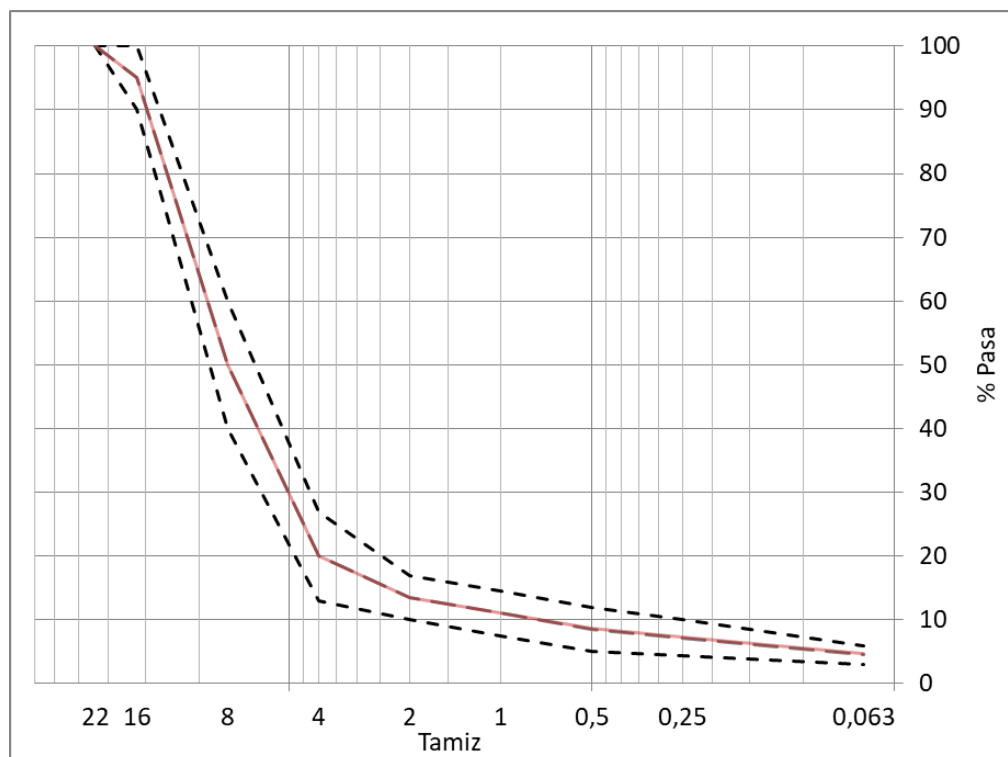


Figura 19. Curva granulométrica CA

5.1.2. Densidad y porcentaje de huecos

Como podemos observar en la Tabla 11, en el caso de las mezclas AC no se aprecia ninguna diferencia significativa entre los resultados de referencia y los de escoria blanca.

Ensayo de huecos (UNE EN 12697 – 8)			
	Referencia	Escoria blanca	PG-3
Densidad (g/cm ³)	2,47	2,48	-
Huecos en mezcla (%)	4,2	4,3	4-6
Huecos en árido (%)	15	15,1	>15%

Tabla 11. Ensayo de huecos en las mezclas AC.

5.1.3. Determinación de la energía de compactación

Para comprobar si el uso de escoria blanca como sustituyente del filler calizo influía en la energía de compactación de las mezclas, se realizó el ensayo de Compactibilidad (UNE EN 12697 – 10) con la máquina giratoria. Para ambas mezclas se calculó el factor de compactibilidad (K) ajustando el porcentaje de huecos en función del número de ciclos, tal y como puede verse en la siguiente figura.

En el siguiente grafico podemos observar la evolución del contenido de huecos en función del logaritmo neperiano del número de ciclos.

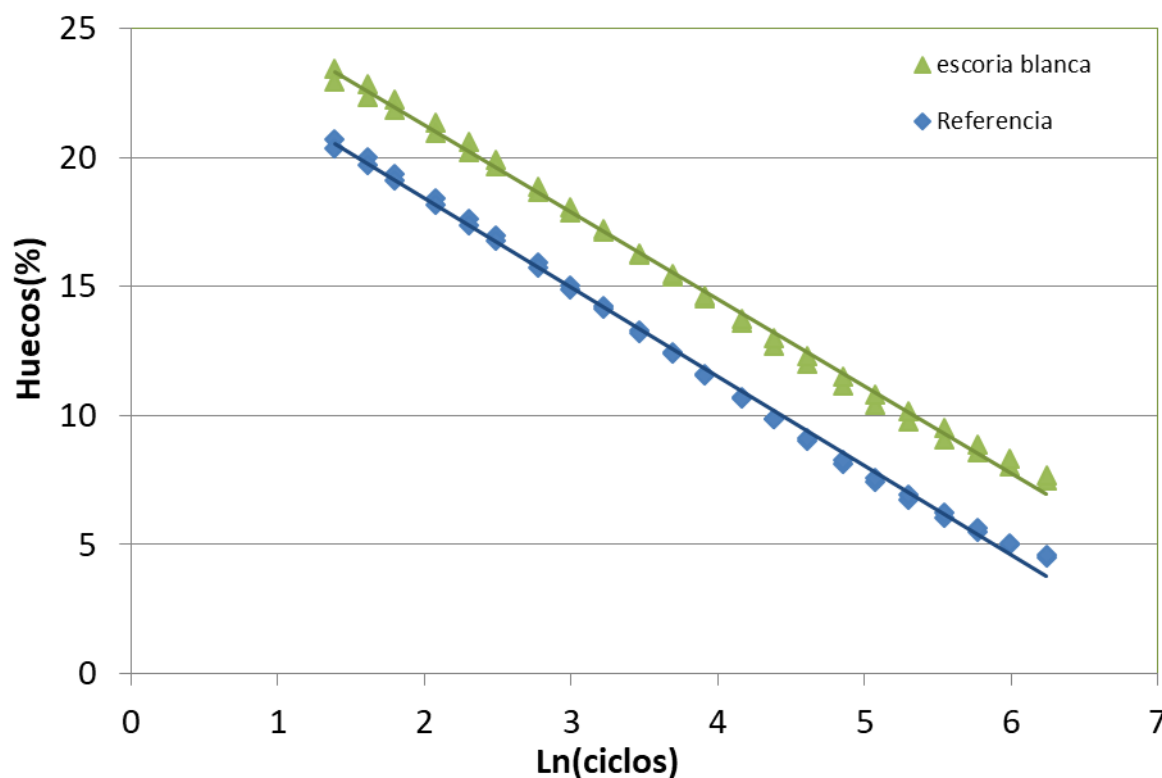


Figura 20. Variación del número de huecos en función del logaritmo neperiano del número de giros de las mezclas AC.

Para el ajuste de estas rectas se utilizó la Ecuación 1 permitiendo de esta manera la determinación del factor de compactibilidad K. Si ambas mezclas parten de un mismo porcentaje de huecos inicial (H_1), un incremento de dicho factor K se relaciona con una mayor facilidad de compactación. En la siguiente tabla se representan los valores de H_1 , el factor de compactibilidad K y el coeficiente de correlación para ambas mezclas.

Mezcla	H_1	K	R^2
Referencia	25,3	3,45	0,99
Escoria blanca	27,9	3,36	0,99

Tabla 12. Parámetros de compactibilidad de las mezclas AC

Podemos observar que en la mezcla experimental tiene un porcentaje de huecos para el primer giro muy superior al de la mezcla de referencia, por lo que no pueden considerarse

determinantes las posibles diferencias de K, que además, en este caso no se producen. sin que prácticamente varíe el factor de compactibilidad K.

A continuación se muestra la energía de compactación acumulada, obtenida partiendo del esfuerzo cortante junto al porcentaje de huecos de la mezcla, utilizando la Ecuación 2 (definida en el apartado de metodología) del modelo desarrollado por Del Rio [29].

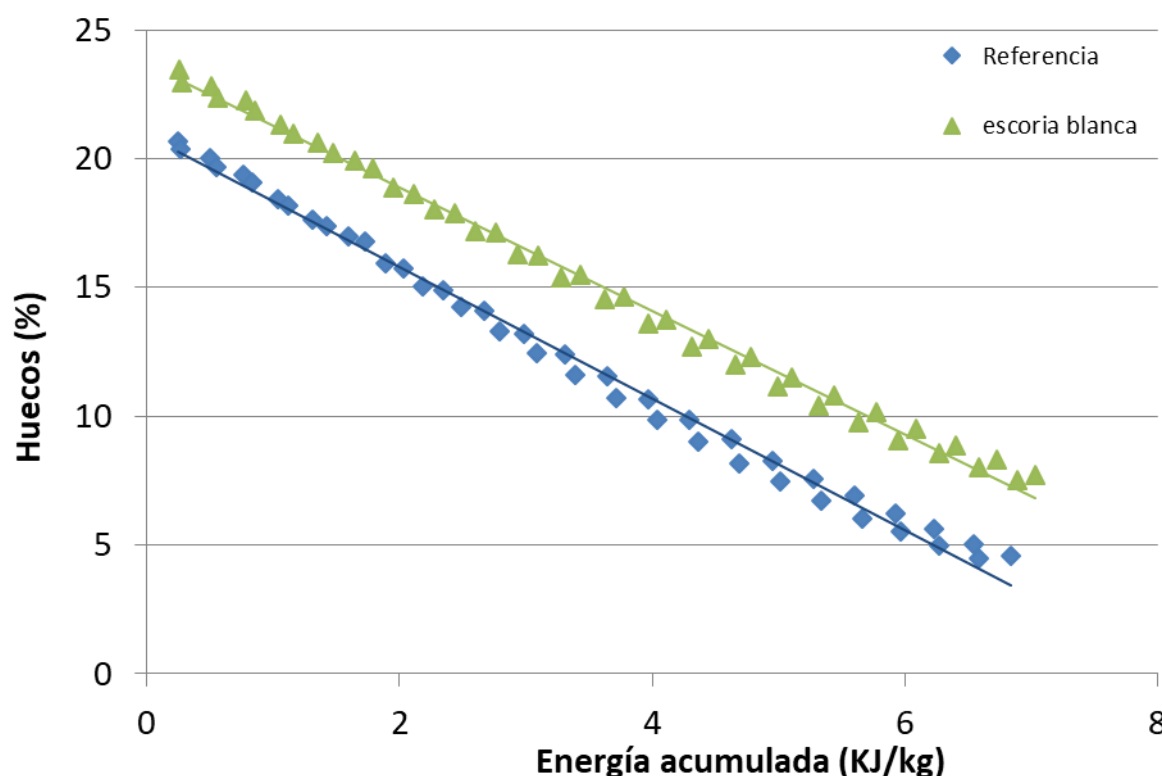


Figura 21. Energía requerida para alcanzar un contenido de huecos en función de la temperatura de las mezclas AC

Podemos observar que en la mezcla experimental para conseguir el mismo porcentaje de huecos, necesita una mayor energía de compactación que la de referencia. Los resultados se aproximaron por mínimos cuadrados a dos rectas con la siguiente ecuación:

$$W = a - b * H$$

Donde W (kJ/kg) es la energía de compactación por unidad de peso, H (%) es el contenido de huecos en mezcla, y los parámetros a y b son constantes.

Mezcla	a	b	Energía _{HR}	R ²
Referencia	20,879	2,550	6,538 kJ/kg	0,99
Escoria blanca	23,676	2,397	8,097 kJ/kg	0,99

Tabla 13. Energía acumulada en función del porcentaje de huecos de las mezclas AC.

Podemos observar que la energía de compactación requerida para la mezcla experimental es mayor que la necesaria en la mezcla de referencia. Destacar, que al realizar este ensayo con la máquina giratoria, en este caso se están analizando los huecos geométricos en lugar de los obtenidos hidrostáticamente, motivo por el cual las dos mezclas no llegan a alcanzar los valores del ensayo de huecos visto con anterioridad.

5.1.4. Adhesividad árido-ligante

Como podemos observar en la Tabla 14 se produce un incremento en las resistencias de la mezcla experimental especialmente en condiciones húmedas, no sufriendo ésta daño por el agua al mantener la resistencia original.

Ensayo de sensibilidad al agua (UNE EN 12697 – 12)			
	Referencia	Escoria blanca	PG-3
I. T. S. Secas (kPa)	2685,7	2839,5	-
I.T. S. Húmedas (kPa)	2275	2908,2	-
I.T. S. R. (%)	85	102	≥85

Tabla 14. Ensayo de sensibilidad al agua en las mezclas AC.

Se puede apreciar que en este caso, en la mezcla experimental, el valor de las probetas húmedas es superior al de las secas, estas diferencias podrían deberse a algún proceso químico en la escoria blanca, a pesar de haber sido previamente hidratada, o tal vez se podría considerar que el 2% de incremento en el I.T.S.R es producto de la propia sensibilidad del ensayo. En cualquier caso, la resistencia a tracción indirecta de la mezcla experimental y su comportamiento frente a la acción del agua mejoran los resultados obtenidos por la mezcla de referencia.

5.1.5. Resistencia a las deformaciones plásticas.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las dos mezclas frente a las deformaciones plásticas:

Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697 – 22)			
	Referencia	Escoria blanca	PG-3
Pendiente media (mm/1000ciclos)	0,13	0,19	0,15*
Rodera (mm)	4,6	4,7	-

*En función de la zona climática y la categoría de tráfico.

Tabla 15. Ensayo de rodadura sobre hormigones bituminosos con filler de escoria blanca

Podemos observar un descenso muy significativo de la resistencia a deformación plástica en la mezcla experimental, además, los resultados limitan el uso de este tipo de mezclas para la categoría de tráfico pesado T4 o T3 en zonas térmicas templadas. Si se quisiera emplear estas mezclas experimentales para categorías de tráfico superiores (sin modificar las condiciones de la granulometría y el tipo de betún), sería necesario partir de una mezcla con mejores resistencias a las deformaciones plásticas.

5.2. Mezclas PA

5.2.1. Caracterización granulométrica

Al igual que en la mezcla AC, se empleó la misma granulometría en las dos mezclas sustituyéndose el tanto por ciento en peso de filler calizo por escoria blanca. Utilizándose un porcentaje de betún sobre mezcla de 4,5%.

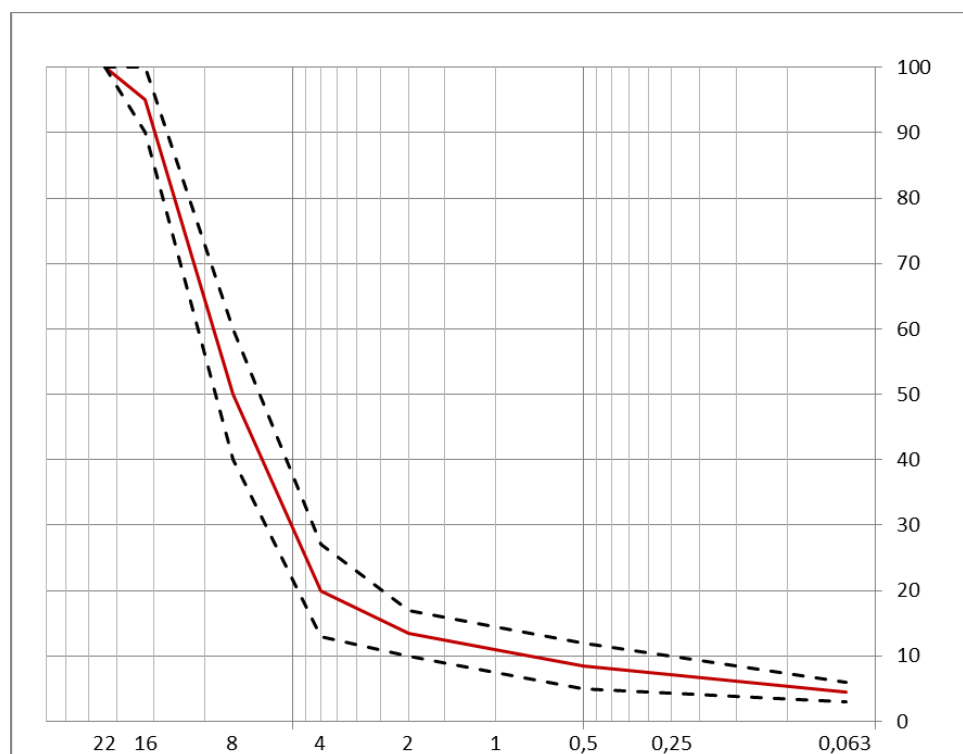


Figura 22. Curva granulométrica PA referencia.

5.2.2. Densidad y porcentaje de huecos.

En el caso de las mezclas PA, a diferencia de las AC, podemos observar un ligero incremento en el porcentaje de huecos. Cumpliendo ambas mezclas con los requisitos especificados en el PG-3.

Ensayo de huecos (UNE EN 12697 – 8)			
	Referencia	Escoria blanca	PG-3
Densidad (g/cm ³)	2,16	2,07	-
Huecos en mezcla (%)	20,1	21,1	≥20

Tabla 16. Ensayo de huecos en las mezclas PA.

5.2.3. Determinación de la energía de compactación

Al igual que en las mezclas AC se realizó el ensayo de Compactibilidad (UNE EN 12697 – 10) con la máquina giratoria. Calculándose para ambas mezclas el factor de compactibilidad (K) utilizándose el ajuste del porcentaje de huecos en función del número de ciclos.

En el siguiente grafico podemos observar la evolución del contenido de huecos en función del número de ciclos.

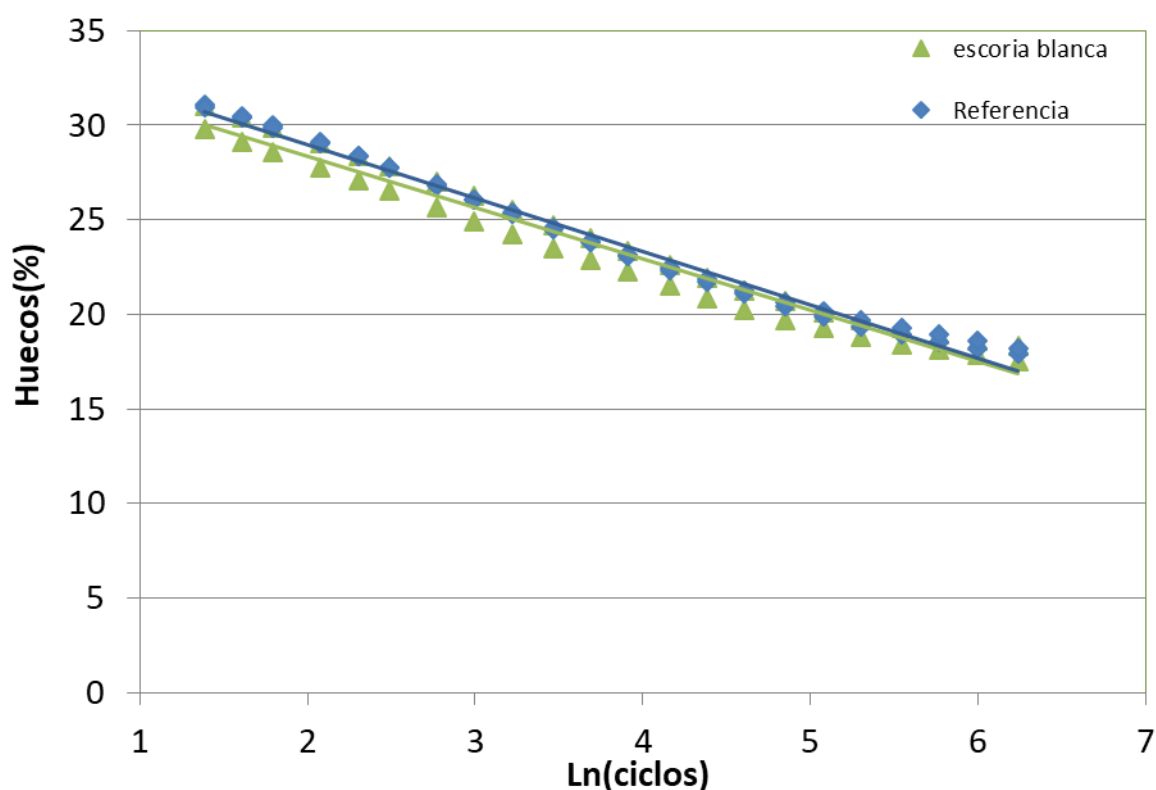


Figura 23. Variación del número de huecos en función del logaritmo neperiano del número de giros de las mezclas PA.

Para la determinación del factor de compactibilidad K también se utilizó la ecuación 1. En la siguiente tabla se representan los valores de H1, el factor de compactibilidad K y el coeficiente de correlación para ambas mezclas.

Mezcla	H ₁	K	R ²
Referencia	34,625	2,819	0,99
Escoria blanca	33,789	2,712	0,97

Tabla 17. Parámetros de compactibilidad de las mezclas PA.

En este caso en la mezcla experimental se produce un descenso del porcentaje de huecos aunque poco significativo, sin que prácticamente varíe el factor de compactibilidad K.

A continuación se muestra la energía de compactación acumulada, obtenida partiendo del esfuerzo cortante junto al porcentaje de huecos de la mezcla, utilizando la Ecuación 2 del modelo desarrollado por Del Rio [29].

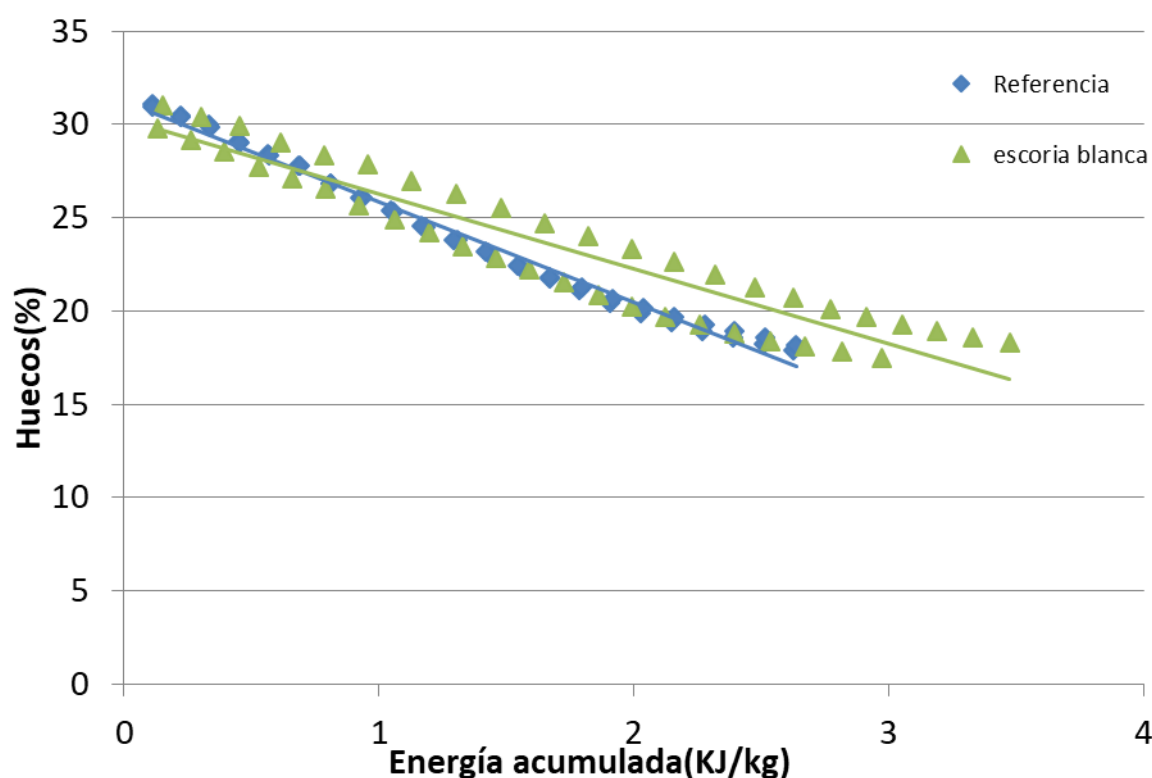


Figura 24. Energía requerida para alcanzar un contenido de huecos en función de la temperatura de las mezclas PA

AL igual que en las mezclas AC los resultados se aproximaron por mínimos cuadrados a dos rectas, cuyos valores aparecen representados en la Tabla 18.

Mezcla	a	b	Energía _{HR}	R ²
Referencia	31,255	5,392	2,068 kJ/kp	0,98
Escoria blanca	30,266	4,005	2,288 kJ/kp	0,89

Tabla 18. Energía acumulada en función del porcentaje de huecos de las mezclas PA.

En el caso de las mezclas PA, a pesar de reemplazar el polvo mineral natural por escoria blanca, no se aprecian diferencias significativas entre la compactación ambas mezclas, por lo que no sería necesario, a priori, modificar el proceso de puesta en obra.

5.2.4. Adhesividad árido-ligante

Podemos observar un ligero aumento de la resistencia. Siendo en este caso el daño producido por el agua similar en ambas mezclas, pudiendo esto deberse a que el aumento en el número de huecos facilita la accesibilidad del agua, a diferencia de lo que sucede en las mezclas AC.

Ensayo de sensibilidad al agua (UNE EN 12697 – 12)			
	Referencia	Escoria blanca	PG-3
I. T. S. Secas (kPa)	1313	1431,3	-
I.T. S. Húmedas (kPa)	1225	1254,9	-
I.T. S. R. (%)	93	88	≥85

Tabla 19. Ensayo de sensibilidad al agua en las mezclas PA.

En cualquier caso, ambas mezclas muestran un buen comportamiento con unas resistencia a tracción indirectas altas, y cumpliendo con margen la resistencia conservada especificada en el PG-3.

5.2.5. Pérdida de partículas

Ensayo Cántabro de pérdida de partículas (UNE 12697-17) y (NLT-362)					
	Referencia	Escoria blanca		PG-3	
		Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
Perdida de partículas (%)	7,9	6,3	6,0	<20%	<35%

Tabla 20. Ensayo de pérdida de partículas.

En este caso no se observan diferencias significativas a pesar que la mezcla experimental tiene un porcentaje de huecos mayor, lo que a priori se puede considerar como un resultado positivo. Analizando los resultados por separado, cabe destacar que el efecto del mástico con filler calizo o de escoria blanca presenta un comportamiento similar, obteniendo ambas mezclas muy buenos resultados de pérdida de partículas, descartando por tanto que puedan presentar problemas de este tipo a nivel mecánico. Llamando la atención que el valor del cántabro húmedo sea del mismo orden de magnitud que el seco, lo cual es un resultado singular. Pudiéndose deber esto a reacciones química que se producen entre la escoria blanca hidratada y el betún o el agua.

5.2.6. Esgurrimento del ligante

Ensayo de esgurrimento (UNE-EN 12697-18)		
Referencia (%)	Escoria blanca (%)	PG-3
0,00	0,03	-

Tabla 21. Valores del ensayo de esgurrimento.

Como se especifica en el apartado de metodología, a pesar de que el PG-3 sólo especifica que no se produzca esgurrimento, sin aportar un valor específico, se tomará un porcentaje máximo de esgurrimento de un 0,3% de betún sobre mezcla [30], [31]. Por tanto los resultados del ensayo son muy favorables, posibilitando un correcto transporte y uso de estas mezclas.



Figura 25. Escurrimiento del betún al finalizar el ensayo.

6. CONCLUSIONES

Siendo el objetivo de este proyecto la evaluación de la escoria blanca de horno de arco eléctrico como sustituyente del árido fino o del filler en mezclas bituminosas y una vez realizadas todas las pruebas pertinentes, se pueden remitir las siguientes conclusiones:

- Con este estudio se ha demostrado que es viable la reutilización de un subproducto industrial como es la escoria blanca de horno de arco eléctrico para sustituir el filler natural.
- La escoria blanca, dada su fragmentación, no se ha demostrado útil para su empleo como sustituyente de la fracción fina, para un tamaño inferior a 2 mm.
- Sería necesario modificar el proceso de hidratación y tratamiento de la escoria blanca con el objetivo de facilitar su uso en hormigones bituminosos.
- Con respecto a la mezcla AC, el filler de escoria blanca es un material válido en cuanto a la adhesividad árido-ligante, mejorando los resultados de la mezcla de referencia; pero, aumentó las deformaciones plásticas restringiendo su uso para categorías de tráfico ligero.
- El empleo de escoria blanca como filler en mezclas porosas presenta características similares a la mezcla de referencia posibilitando su uso para cualquier categoría de tráfico pesado, demostrando un bajo porcentaje de pérdida por desgaste así como una buena adhesividad árido-ligante.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de la línea tomada en este trabajo se proponen las siguientes posibilidades de investigación:

- Su empleo para la realización de mezclas BBTM y SMA, las cuales no se han desarrollado en esta investigación.
- Su empleo en suelos facilitaría su reutilización dada las grandes cantidades utilizadas en el movimiento de tierras.
- Comprobar si se podría modificar el proceso de hidratación para definir si se modifican sus características mecánicas.

8. REFERENCIAS

- [1] Parlamento and D. Europeo, “DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (Texto pertinente a efectos del EEE),” pp. 3–30, 2008.
- [2] C. LUACES FRADES, “La Gestión De Los Recursos Naturales De Áridos. Problemática De Abastecimiento En La Comunidad De Madrid. I Congreso De Urbanismo Y Ordenación Del Territorio. ‘Ciudad Y Territorio’, 29 de Febrero de 2008, 2008. pp. 1-24.”
- [3] F. Hoffmann, “Comunicado de prensa,” *Gr. Commun. Roche*, pp. 1–3, 2011.
- [4] E. N. Materia and D. E. R. Y. Televisión, “Comunicado de Prensa Comunicado de Prensa,” no. 56, pp. 1–4, 2012.
- [5] S. Navigation and N. S. Route, “M-E Pavement Design Manual. 2019^a ed. Colorado: Colorado Department of Transportation, 2019,” vol. 8380, pp. 1–41.
- [6] “a_542f @ www.carreteros.org.”
- [7] “Asphalt in figures 2017,” *Asphalt in figures 2017*, vol. 3, 1385.
- [8] “Ministerio de Fomento. Real Decreto 635/2006. Madrid, España: Reino de España, 26 de Mayo de 2006, 2006. ISBN BOE núm. 126.”
- [9] A. Copeland, “Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice,” *Rep. No. FHWA-HRT-11-021*, no. FHWA, p. McLean, Virginia, 2011.
- [10] J. Rico Arenal and Jokin, “Estudio, análisis y diseño de aplicaciones de áridos procedentes de la valorización de residuos industriales: firmes de carreteras y hormigones,” Feb. 2021.
- [11] J. Enríquez, B. Tremps, S. de Bengy, and D. Fernández, “Jose Luis Enríquez Berciano Enrique Tremps Guerra Susana de Elío de Bengy Daniel Fernández Segovia.”
- [12] G. V. O. Hendrik, “2011 Minerals Yearbook: Slag-Iron and Steel,” *2011 Miner. Yearb.*, no. January, 2013.
- [13] Sociedad Pública de Gestión Ambiental, “Escorias De Acería De Horno De Arco Electrico,” pp. 1–22, 2013.
- [14] D. Generales, “1. Disposiciones Generales,” pp. 11543–11559, 2008.
- [15] O. Saila, “Xedapen Orokorak,” pp. 12997–13005, 2002.
- [16] C. R. Grünig, V. Queloz, A. Duò, and T. N. Sieber, “Decrteo 32/2009,” *Mycol. Res.*, vol. 113, no. 2, pp. 207–221, 2009.
- [17] M. Mancio, “Contribuição ao Estudo do Fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria Elétrica,” *Ufrgs*, no. June, p. 160, 2001.
- [18] M. Skaf, J. M. Manso, Á. Aragón, J. A. Fuente-Alonso, and V. Ortega-López, “EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 120, pp. 176–185, 2017.
- [19] M. Fomento, M. medio ambiente y Rural, and CEDEX, “Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico,” *Cedex*, vol. 2.3, pp. 1–19, 2011.
- [20] M. Pasetto and N. Baldo, “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 181, no. 1–3, pp. 938–948, 2010.
- [21] A. Behnood and M. Ameri, “Sharif University of Technology Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag,” *Sci. Iran.*, vol. 19, no. 5, pp. 1214–1219, 2012.
- [22] F. Maghool and A. Arulrajah, “Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol.

-
- 19, no. 4, pp. 949–958, 2017.
- [23] M. Skaf, V. Ortega-lópez, J. A. Fuente-alonso, A. Santamaría, and J. M. Manso, “Ladle furnace slag in asphalt mixes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 488–495, 2016.
 - [24] E. Bocci, “Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 156–164, 2018.
 - [25] V. Ortega López, “‘Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales’, Universidad de Burgos,” 2011.
 - [26] I. Arribas García, “‘Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad técnica’, Universidad del País Vasco,” 2011.
 - [27] M. I. Barrio, Prieto, “‘Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cemento por escorias blancas de horno cuchara’, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid,” 2012.
 - [28] I. S. VICARIO, “Escuela politécnica superior. Fabricación de morteros de albañilería con escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria blanca de horno cuchara LF,” 2015.
 - [29] D. R. P. Maria, “Estudio De Los Procesos De Compactación Y Post-Compactación De Mezclas Bituminosas Empleando Nuevos Índices Energéticos: Aplicación a Mezclas De Alto Módulo Que Contienen Cantos Rodados. . CALZADA PÉREZ, Miguel Ángel; and VEGA ZAMANILLO, Ángel eds., Santa,” 2011.
 - [30] N. Bala, M. Napiah, and I. Kamaruddin, “Effect of nanosilica particles on polypropylene polymer modified asphalt mixture performance,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 8, no. March, pp. 447–454, 2018.
 - [31] K. A. Masri, A. K. Arshad, and M. S. Samsudin, “Mechanical properties of porous asphalt with nanosilica modified binder,” *J. Teknol.*, vol. 78, no. 7–2, pp. 139–146, 2016.